第46卷 第10期
2023年10月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 10
Oct. 2023

基于多端元解混模型的博斯腾湖区域植被和水域时空变化特征及趋势分析

亚夏尔·艾斯克尔[1]， 玉素甫江·如素力[1,2]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；
2. 新疆干旱区环境与资源重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830054）

摘　要： 湿地高精度动态变化遥感监测，对于湿地保护和恢复具有重要的实践意义。以新疆博斯腾湖湿地为研究对象，运用多端元混合像元分解（Multiple endmember spectral mixture analysis，MESMA）模型提取Landsat影像中植被、水体和裸地面积，通过无人机影像验证精度后，结合趋势分析法探明2000—2022年博斯腾湖湿地时空变化特征及趋势。结果表明：（1）通过无人机影像重采样精度验证的MESMA分类结果中植被像元拟合优度（R^2）为0.75，水体像元R^2为0.84，表明分类结果符合实际地物情况。（2）2000—2022年博斯腾湖湿地植被面积共增加536.65 km²，增加了183.14%；水域面积则减少595.76 km²，减少了37.07%；裸地面积共增加99.12 km²，增加了25.42%。（3）博斯腾湖湿地植被面积呈增加趋势的区域占总面积的30.6%，位于大湖区西北部和小湖区北部；反之水域面积呈减少趋势的区域占总面积的34.6%，位于大湖北岸、东岸及小湖湿地。准确掌握博斯腾湖湿地时空变化情况及其趋势，可对干旱区内陆湿地监测与保护提供参考依据。

关 键 词： MESMA；混合像元；湿地；时空变化；博斯腾湖
文章编号： 1000－6060(2023)10－1622－10(1622～1631)

湿地作为天然物种的基因库，在净化水质、调节流量、保留营养物质、保持气候稳定、旅游休闲等生态功能和社会经济效益方面，起到至关重要的作用[1-2]。根据《国际湿地公约》的定义，湿地系指天然或人工、永久或暂时之死水或流水地、淡水、微咸水或碱水、沼泽、湿草地、泥炭地或水域，包括在低潮时不超过6 m深的水域。博斯腾湖位于新疆焉耆盆地，2017年获批国家湿地公园，目前是我国占地面积最大国家湿地公园。20世纪60年代到80年代，博斯腾湖由淡水湖演变成微咸湖，湖水面积萎缩，湖周湿地大面积消亡。近20 a，当地政府积极推进博斯腾湖流域生态环境综合治理，湿地生态功能和水体修复得到明显改善，而开展长时间、高精度的湿地变化观测对于进一步保护与恢复博斯腾湖湿地显得尤为重要[3]。

采用遥感手段开展湿地变化观测需要对湿地地物类型进行精准的识别。由于遥感影像空间分辨率的影响，单个像元中通常会存在多种地物类型，这种像元就被称为“混合像元”[4]。而将混合像元无论归为任何单一地物都是错误的，因为它不完全属于某一种地物。混合像元的存在影响着遥感技术在地物分类上的精度[5-6]。湿地的生物多样性比较复杂，景观破碎化程度比较高，遥感影像中混合像元普遍存在，严重干扰了湿地地物分类的精度[7]。国内外专家对遥感数据混合像元分解进行了大量的研究，吴见等[8]针对干旱区中的农牧交错地带，通过改进线性光谱混合分解模型在提取出更精确的草原植被光谱信息的同时也减少了土壤端元对光谱模型的干扰，提高针对干旱区草甸类型的分类精度。李微等[9]将全约束最小二乘混合像元技术推广

收稿日期： 2023-01-11； **修订日期：** 2023-02-21
基金项目： 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2020D04039)；国家自然科学基金NSFC联合基金项目(U1703341)资助
作者简介： 亚夏尔·艾斯克尔(1995-)，男，硕士研究生，主要从事空间信息分析与应用研究. E-mail: yashar105@163.com
通讯作者： 玉素甫江·如素力(1975-)，男，博士，教授，主要从事流域水文与生态遥感研究. E-mail: Yusupjan@xjnu.edu.cn

到我国滨海湿地面向像元的分类研究中，为滨海湿地面向像元分类提供了理论支持。李哲等[10]将面向对象方法与多端元解混模型相结合反演扎龙湿地植被覆盖度并取得较好的效果。以上研究运用混合像元分解方法提高了地物信息提取的精度，但是这些研究集中在滨海湿地、自然沼泽地区以及河流三角洲地区，对干旱区湿地，特别在博斯腾湖湿地的研究还非常少。新疆博斯腾湖湿地是中国最大的内陆湖泊湿地，也是新疆重要的生态系统和水资源。针对该湿地的研究日益增多，曾光等[11]用多源遥感数据分析博斯腾湖湿地演化规律和发展趋势，为制定合理、有效的湿地保护措施提供理论依据。王涛等[12]对博斯腾湖流域植被覆盖的空间差异变化进行研究，为评估未来流域水文水资源变化提供参考。但是大多数学者只在传统的像元尺度上进行分类，忽视了混合像元对地物提取精度的影响。

近几十年来，新疆博斯腾湖湿地环湖区域社会经济发展相当迅速，人口不断增长，农田面积持续增加[13]，湿地的植被、裸地和水体交叉分布，景观破碎化程度增加，在一块像元中掺杂了各种地物，导致混合像元现象比较严重。使用传统的像元尺度分类算法来解译，很难有效解决湿地地物交错混合的问题。多端元混合像元分解（Multiple endmember spectral mixture analysis，MESMA）模型[14]是在线性光谱混合（Linear spectral mixture analysis，LSMA）模型基础上改进而来的混合像元分解方法。MESMA模型在建立地物端元光谱库的基础上，针对每一种地物采用多种端元光谱组合进行分解，提取出像元中每种地物所占的百分比，可以有效改善椒盐现象[15-17]。

本文针对博斯腾湖湿地目前的特点，以Landsat TM/ETM+/OLI影像为数据源，通过MESMA模型获取博斯腾湖湿地典型地物类型的丰度值，构建以植被、水体、裸地为组分的解混模型，反演博斯腾湖湿地地物分类结果，并通过在研究区实地拍摄的无人机影像分类结果进行精度评价，实现博斯腾湖湿地亚像元级别信息提取，动态监测博斯腾湖湿地的演变过程，明晰时空变化变化规律。其目的是探究一种提高干旱区湿地典型地物类型信息提取的方法，同时为博斯腾湿地监测与保护提供有效的理论依据和数据支持。

1　研究区概况

新疆博斯腾湖位于新疆焉耆盆地最低洼处，地势西北高东南低，是开都河的尾闾，也是孔雀河的发源地（图1）。博斯腾湖湿地植被类型以芦苇（*Phragmites australis*）为主，长苞香蒲（*Typha angustata*）、和狭叶香蒲（*Typha angustifolia*）为辅，形成我国第四大芦苇湿地区[18]。研究区气候干旱少雨，蒸发强烈，属温带大陆性荒漠气候，夏季干旱炎热，冬季寒冷少雪，年降水量为68.2 mm，年蒸发量为2200 mm。本文以博斯腾湖大湖区、小湖区主要水源宝浪苏木分水枢纽站（开都河第3分水站）为基准（海拔高度约1050 m），确定研究区边界[19]，并将博斯腾湖以开都河东、西支流中间线和S205公路为界区分大、小湖区。博斯腾湖总面积为2450.65 km²，其

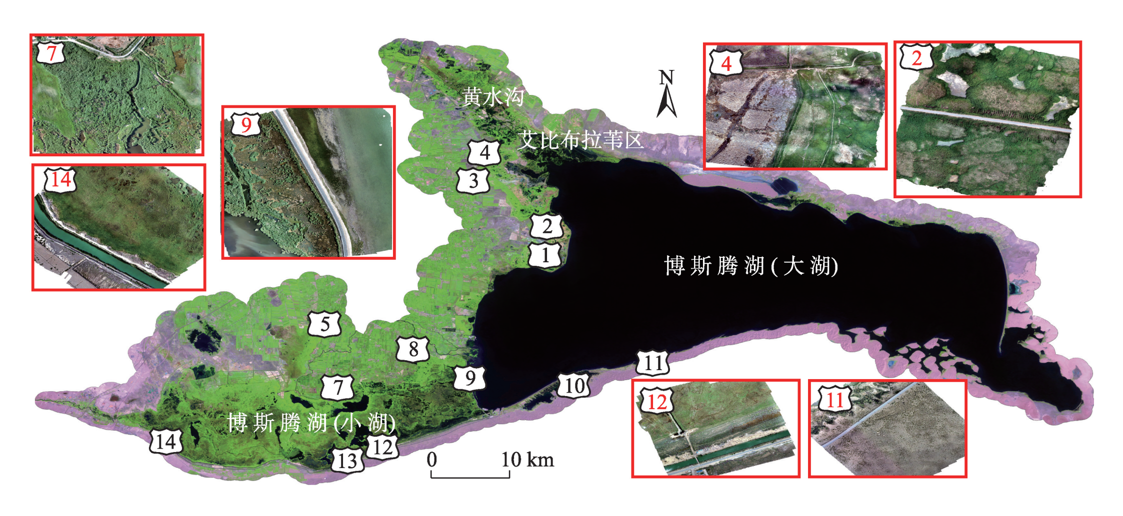


图1　研究区与无人机航拍区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area and aerial drone photography area

中大湖区面积为1777.43 km²,小湖区为673.22 km²。

2 数据与方法

2.1 数据来源

Landsat系列数据:选用Landsat TM/ETM+/OLI系列数据Collection2-Level 2-Tier1地表反射率产品,该产品不仅具有较好的几何和辐射定标精度,而且各传感器图像之间也有超高的一致性。考虑博斯腾湖湿地植被物候特征,选择每年7—8月成像的云覆盖度<20%的数据,2000—2022年共有1748景(其中,OLI为469景,ETM+为747景,TM为532景)。

无人机航拍数据:2022年8月3日随团队前往研究区实地拍摄,天空晴朗可见度较高。使用大疆精灵4Pro无人机作业,设定飞行高度为100 m,速度9.7 m·s⁻¹,拍摄角度90°,航向重叠度80%,旁向重叠度70%,拍摄面积为41400 m²,影像空间分辨率为2.73 cm[20]。飞行任务完成后,通过Argisoft Photoscan软件合成处理航拍图像,获得区域RGB影像和数字高程(Digital elevation model,DEM)[21]。

2.2 研究方法

MESMA是一种混合像元分解方法,通过提取混合像元中各类地物的丰度值提高地物分类的精度。具体步骤为:首先对2000—2022年23幅合成TM、ETM+、OLI多光谱影像进行预处理,然后根据计算出的归一化植被指数创建随机采样点,通过所提取的植被、裸地、水体随机采样点多值提取至点选取各波段中的值,在R语言中利用MESMA模型将各端元波谱值信息与Landsat影像叠加计算,分解混合像元得到植被、水体、裸地3种组分的丰度值,提取出典型地物信息。接着,根据像素丰度提取出3种地物的面积。同时对更高空间分辨率的无人机航拍影像进行面向对象分类,经重采样及像元配准得到与MESMA模型对应像元的地物面积占比,将其假定为真实的像元丰度值以作参考。计算出像元分解得到的植被和水体丰度值与真实面积占比之间的拟合度,验证混合像元模型的适用性。最后,根据提取后的影像进行一元线性回归趋势分析,得出博斯腾湖湿地典型地物变化趋势。

2.2.1 多端元混合像元分解(MESMA)模型 MESMA模型选用最小二乘法误差最小的端元组合提取出像元中不同端元所占的百分比。本研究选择了植被-水体-裸地3种端元组合。混合像元分解共分为两步[22-23],即端元确定与提取、混合像元解混。

(1) 端元光谱确定与提取。端元选取就是将混合像元中所包含的地物类型和数目设定为特征组分,端元选取直接影响混合像元分解中组分数据的准确度[24]。MESMA模型应用到Landsat影像时,根据研究区地物的类别,选择3个端元组分较为合理。根据博斯腾湖湿地遥感数据植被归一化指数(NDVI)结果,按照三分模型建模原则,采取多值提取至点方法创建随机采样点,分别从植被、水体、裸土3种地物类型的样本点,数量分别为植被端元100个、水体端元100个、裸土端元50个,总计250个。

$$\mathrm{NDVI}=\frac{R_{\mathrm{NIR}}-R_{\mathrm{RED}}}{R_{\mathrm{NIR}}+R_{\mathrm{RED}}} \tag{1}$$

式中: R_{NIR} 和 R_{RED} 分别为Landsat影像的近红外与红光波段的反射率。

(2) 混合像元分解。混合像元分解是依据提取出的混合像元的光谱特征,解析出混合像元中每个端元所占的百分比,即端元丰度。MESMA模型通过选取多个端元波谱对像元中每种地物进行混合像元分解。最广泛的方法是由Roberts等[25]提出的MESMA模型。解混模型的拟合优度通常采用均方根误差(RMSE)来评价[26],公式为:

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{\lambda=1}^{S}{\varepsilon_{\lambda}}^{2}}{S}} \tag{2}$$

式中:S为遥感影像波段数;λ为波段;ε_{λ}为λ的残差。

2.2.2 一元线性回归趋势分析 本文运用一元线性回归趋势分析法从时间和空间上分析植被覆盖度的变化趋势,此方法根据像元分解后的植被像元丰度值得出的植被覆盖度随时间变化相结合得出整个区域的变化趋势[27],公式为:

$$\mathrm{slope}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}i\times \mathrm{fvc}_{i}-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}\mathrm{fvc}_{i}}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^{2}-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^{2}} \tag{3}$$

式中:slope为多年覆被覆盖度线性拟合斜率;n为监测年数;fvc_i为第i年植被覆盖度。

线性拟合斜率可以反映出博斯腾湖湿地植被2000—2022年的覆盖度变化趋势及变化程度。斜率为正,表示覆盖度增加,斜率为负则表示减少;斜率数值越大,表示变化程度越显著,越小则表示变

化程度越小。根据斜率数值将趋势变化特征划分为：显著减少（−0.040~−0.003），轻微减少（−0.003~0.005），无变化（0.005~0.014），轻微增加（0.014~0.024），显著增加（0.024~0.055）5个等级。

2.2.3 面向对象分类方法 无人机影像采用面向对象的分类方法在湿地分类中有着广泛应用[28]，因此在本研究区通过eCognition软件进行无人机影像分类是可行的。首先，将可见光影像和DEM图像进行特征融合，再运用eCognition将影像分割后，选择参与分类的特征样本，最后根据它们在特征空间中的距离和设定的分类规则进行监督分类。

2.2.4 精度评价

（1）无人机影像精度评价。在采用无人机分类结果对混合像元分解模型进行精度验证之前，需对无人机面向对象分类结果进行精度评价。主要评定指标有制图精度（PA，%）、用户精度（UA，%）、总体精度（OA，%）、Kappa系数，公式分别为[29]：

$$PA = \frac{P_{ii}}{P_{+i}} \times 100\% \tag{4}$$

$$UA = \frac{P_{ii}}{P_{i+}} \times 100\% \tag{5}$$

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^{n} -P_{ii}}{N} \times 100\% \tag{6}$$

$$Kappa = \frac{N\sum_{i=1}^{n} P_{ii} - \sum_{i=1}^{n}\left(P_{i+} \times P_{+i}\right)}{N^2 - \sum_{i=1}^{n}\left(P_{i+} \times P_{+i}\right)} \tag{7}$$

式中：P_{ii}为i行i列上每一类中正确分类样本数量的值；P_{i+}为某一类验证样本的总数；P_{+i}为某一类型验证样本总数；n为类型数量；N为验证样本之和。

（2）混合像元分解精度评价。将无人机分类结果进行重采样与2022年7—8月的Landsat影像匹配[30]，得到对应Landsat像元的植被、水体面积比例，并以此对混合像元分解模型得到的植被和水体精度进行精度验证[31]。

3 结果与分析

3.1 MESMA精度

3.1.1 无人机分类精度 对无人机影像进行分类后，定量评价湿地地物信息提取的精度。根据影像目视解译选取206个随机样本点，结合分类结果对比分析完成精度评价（表1）。Kappa系数为0.95，总体精度（OA）达到97.09%，可以证明无人机影像用来验证Landsat混合像元分解精度是可靠的。

表1 无人机图像面向对象分类精度评价

Tab. 1 Accuracy evaluation of UAV image object-oriented classification

地物类型	裸地	植被	水体	总计
裸地	46	2	0	48
植被	1	41	0	42
水体	1	2	113	116
总计	48	45	113	206
制图精度（PA）/%	95.83	91.11	100.00	−
用户精度（UA）/%	95.83	97.62	97.41	−

3.1.2 混合像元分解精度 根据MESMA模型生成的植被、水体、裸地组分丰度，组分丰度值的范围在0~1之间（图2），丰度值越高表示此像元中该地物所占的面积越大。通过与真彩色影像（图2a）进行对比，植被（图2b）、裸地（图2c）和水体（图2d）的地物类型划分更为明显，且能反映出研究区实际地物分布，如图2位置①中的植被、位置②中的裸地和位置③中的水体等。

利用高精度的无人机分类结果进行重采样，对应MESMA模型分解后地物类型，以此为依据对MESMA模型得到的地物丰度提取效果作精度评价。由图3可知，MESMA模型的分类结果与无人机分类结果拟合度比较高。其中，MESMA模型分解出的水体像元与无人机分类结果之间的拟合优度为0.84，植被像元与无人机分类结果的拟合优度为0.75。综上分析可知，采用MESMA模型精度满足要求，能较为准确地分类出研究区不同地物的分布情况，是一种较为理想的地物分类方法。

3.2 博斯腾湖湿地典型地物时空变化特征

2000—2022年博斯腾湖湿地植被面积从453.58 km²增加到990.23 km²，水域面积从1607.2 km²减少到1011.44 km²，裸地面积从389.87 km²增加到448.99 km²（图4）。不同时段湿地覆被面积变化特征不尽相同，以2012年为界面积变化分为3个阶段。第一阶段为2000—2011年，博斯腾湖湿地植被面积总体上呈显著增加趋势，从453.58 km²增加到854.12 km²，共增加400.54 km²；水域面积持续减少，从1607.20 km²减少到1113.14 km²，共减少494.06 km²。植被在大湖区西北部滨湖湿地、小湖区北部增加幅度较大，水域面积则以大湖区湿地西

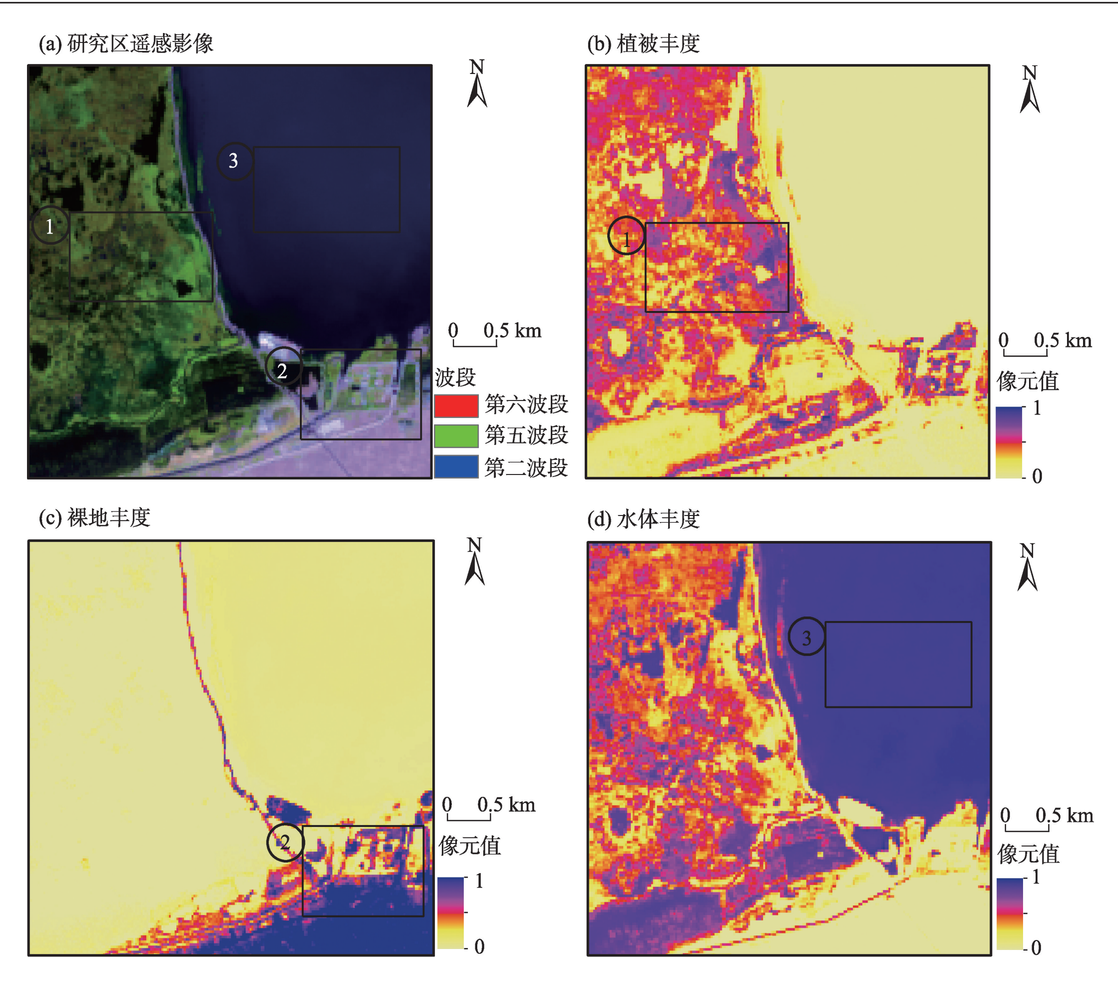


图2 多端元混合像元分解(MESMA)组分丰度

Fig. 2 MESMA fraction

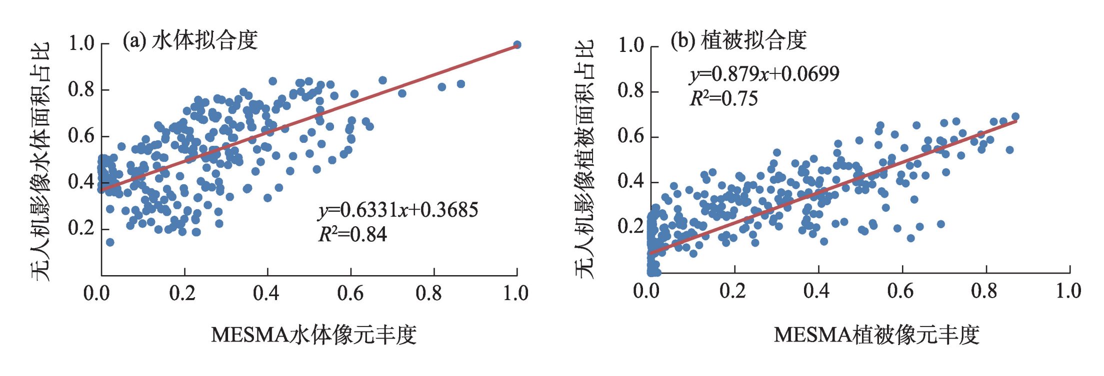


图3 无人机影像地物面积占比与MESMA地物像元丰度拟合优度(R^2)

Fig. 3 R^2 of percentage of feature area by UAV and MESMA fraction

北部湖滨湿地区、博斯腾湖南部边缘狭长水带以及东部边缘缩减程度较大(图5)。第二阶段为2011—2012年,湿地植被面积骤降,从854.12 km²减少到489.93 km²;水域面积则剧增,从1113.14 km²增加到1419.86 km²。植被在大湖区西北部滨湖湿地、以及整个小湖区减少幅度较大,该区域水域面积则相应大幅增加(图5)。第三阶段为2012—2022年,博斯腾湖湿地植被面积呈显著增加趋势,从489.93 km²增加到990.23 km²,共增加500.3 km²;水域面积持续减少,从1419.86 km²减少到1011.44 km²,共减少408.42 km²。植被在大湖区西北部滨湖湿地、小湖北部增加幅度较大,水域面积缩减较大区域主要位于大湖区西北部湖滨湿地、博斯腾湖南部以及东部,但是在大湖北部呈增加趋势(图5)。截止2022

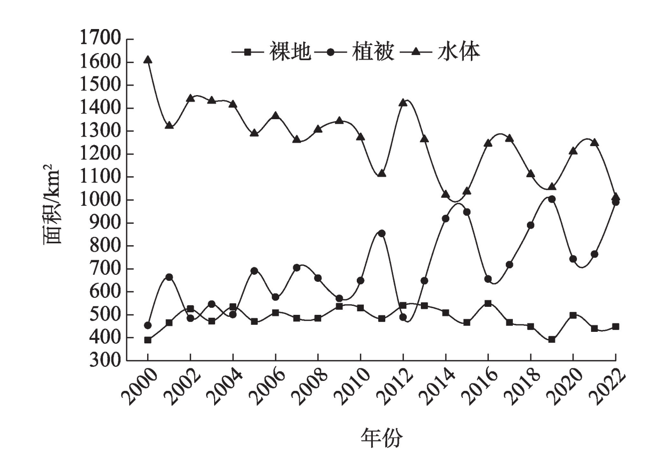


图4　2000—2022年博斯腾湖湿地典型地物变化

Fig. 4　Changes of typical features in Bosten Lake Wetland from 2000 to 2022

年博斯腾湖湿地植被面积共增加536.65 km²(183.14%)，水域面积共减少595.76 km²(37.07%)，裸地面积共增加99.12 km²(25.42%)。

3.3　博斯腾湖湿地植被丰度变化趋势

对博斯腾湖湿地植被丰度进行趋势变化分析(图6)发现，博斯腾湖湿地植被显著减少(-0.040~-0.003)的区域面积占比为5.1%，包括小湖区和黄水沟入水口的芦苇覆盖区域；轻微减少(-0.003~0.005)的区域面积占比为29.5%，包括大湖区北岸滨湖湿地和东岸；轻微增加(0.014~0.024)、显著增加(0.024~0.055)的区域面积占比分别为23.4%、7.2%，包括博斯腾湖湿地西北部和小湖区北部区域；基本无变化区域面积占比为34.8%，主要为农田以及大湖区南部沙漠地带。

4　讨 论

湿地是陆地生态系统的重要组成部分，也是气候变化的评价指标，科学精准地获取水体、植被信息，掌握湿地变化规律特征，对于开展湿地生态环境保护等方面有重要的意义。本文基于MESMA模型探究博斯腾湖湿地典型地物的提取精度，分析了3种典型地物的时空变化特征，结果显示：2000—2022年博斯腾湖湿地中水体时空变化趋势呈现扩张-退缩-扩张的增减交替变化特征，博斯腾湖湿地植被与裸地面积变化呈反比增减趋势。

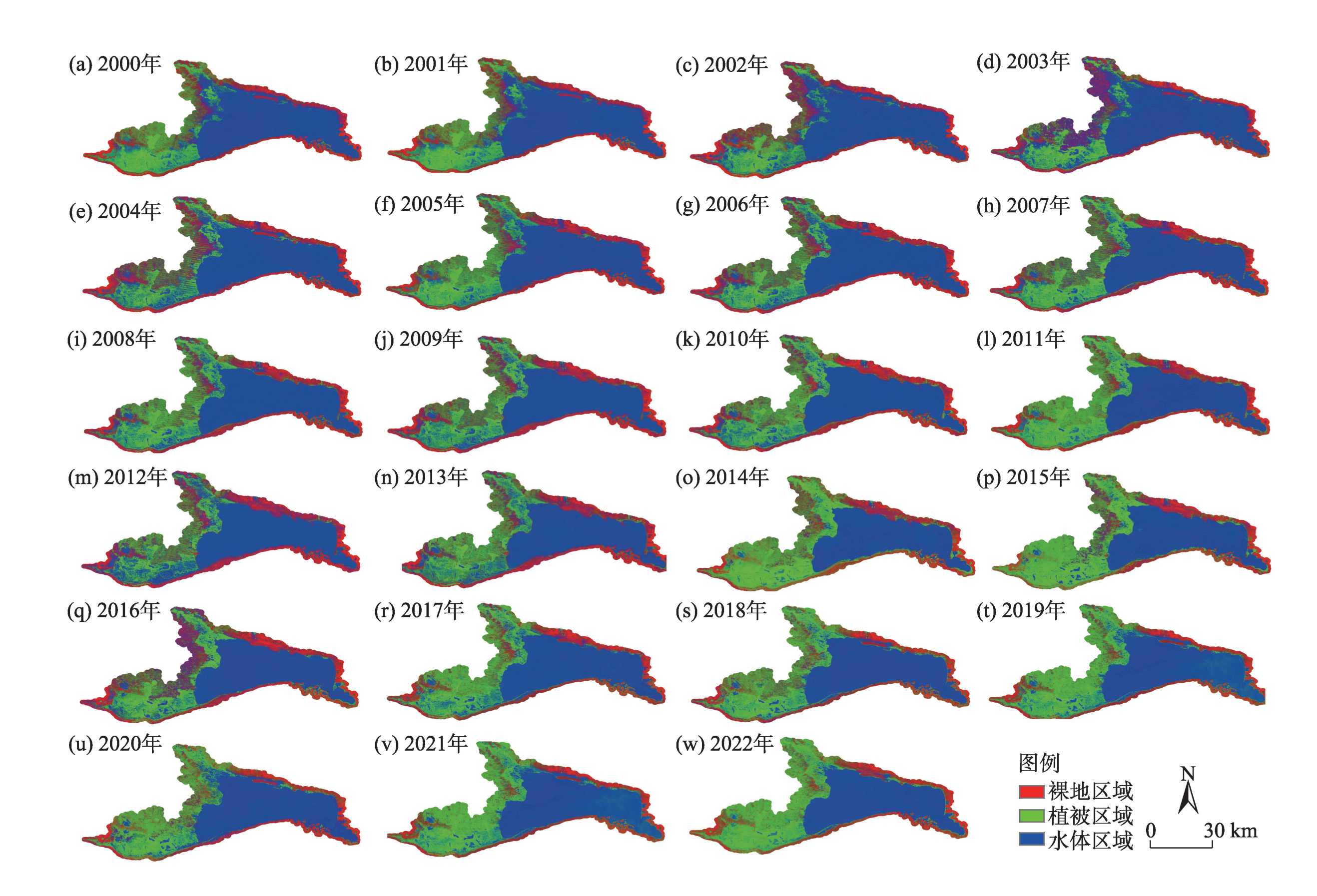


图5　2000—2022年混合像元分解信息提取结果

Fig. 5　Extraction results of mixed pixel decomposition information from 2000 to 2022

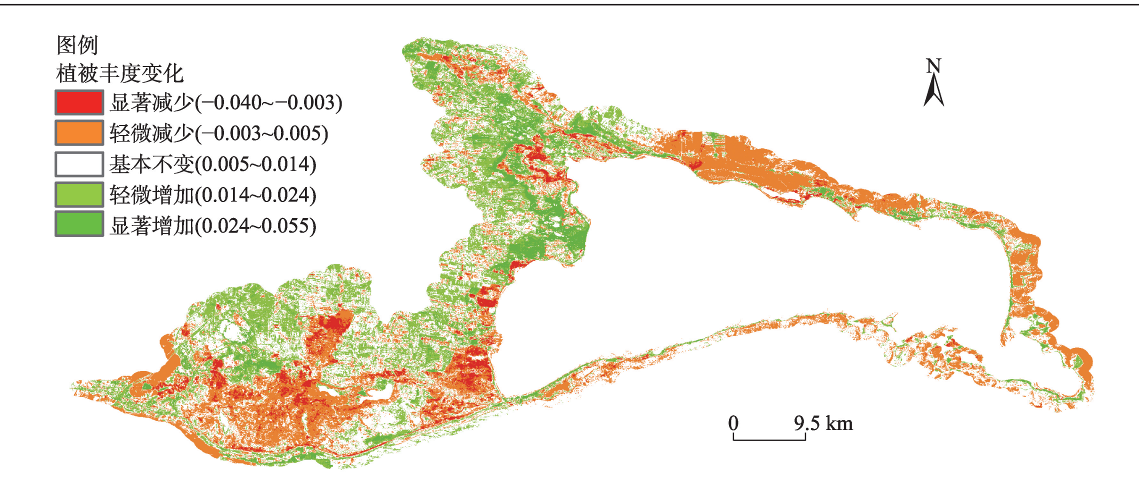


图6 2000—2022年博斯腾湖湿地植被面积变化趋势

Fig. 6 Trends in vegetation area of Bosten Lake wetland from 2000 to 2022

本文针对传统分类方法忽略混合像元而导致的分类精度低的问题，在植被指数的基础上，引入MESMA模型，基于植被-水体-裸地三分模型，通过提取的像元丰度值，解决中等空间分辨率遥感影像在地物分类过程中遇到混合像元的问题。经过与实地拍摄的无人机影像分类结果进行像元叠置计算出水体像元拟合度为0.84，植被像元拟合程度为0.75。MESMA模型对不同的类型像元采用不同的端元组合模型，提高了地物分类的精度，研究结果具有一定的参考价值。但是基于3种地物提取的混合像元中的地物丰度，无法做到地物边界的精确分割。运用大量实测数据获取动态水体及信息，能提高分类的准确性。

植被面积整体增加区域在研究区西北黄水沟滨湖湿地和小湖区北部区域，呈减少趋势的地区主要为大小湖相邻接区域、小湖湿地中部和西北滨湖湿地艾比拉苇区南部入水口区域。首先，当地政府的一系列生态修复工程促进了博斯腾湖湿地的恢复。2001年，国家计委批准实施博斯腾湖水环境保护域治理工程，2009年实施的“干旱半干旱地区湖泊水环境综合治理与生态修复技术研究及工程示范工程”，博斯腾湖为试验示范区；2011年博斯腾湖被列入国家首批8个“生态环境保护试点”湖泊，根据博斯腾湖生态安全现状及发展趋势，通过多层次、多途径调整流域产业结构，采取工程及非工程措施降低流域污染负荷，修复湖滨湿地，有效遏制湖泊咸化趋势，博斯腾湖滨湖湿地尤其是黄水沟滨湖湿地得到一定程度的恢复。同时也可以看出，近湖区域的芦苇湿地与水域面积的变化呈现相反的变化态势，芦苇生长在浅水水域，水位过高会制约芦苇的生长，这与陈昂[31]、买尔哈巴·买买提汗[32]得出的结论相似。同样，除了积极作用，人类活动和气候变化叠加对于博斯腾湖湿地水域和植被的负面影响不容忽视，博斯腾湖大湖水域面积因为1999年的特大洪水，在2000年面积达到最高值，2003—2012年塔里木河流域生态输水工程增加了博斯腾湖的出湖水量，区域降水减少导致干旱频率叠加，加之流域农业灌溉面积不断增加，之后湖水面积呈减少趋势，主要体现在大湖沿岸[33]。2015年之后入湖径流量增加的同时人为对出湖水量的进行控制，水域面积得以快速回升[34]。不容忽视的是，博斯腾湖湿地区植被长势衰退的区域主要在小湖区，重点区域为大小湖隔堤以西以及中部区域，其主要原因可能是2003年前后博斯腾湖大小湖隔堤和放水闸的兴建以及向塔里木河输水，使得小湖区水量减少，进而引起小湖区苇地长势衰退。总之，气候变化叠加人类活动共同影响了博斯腾湖湿地水域与湿地的变化，其影响既有正面，亦有负面，针对不同时期博斯腾湖湿地的空间分布特征及影响主导因素，采取针对性的有效措施显得尤为重要。

5 结 论

（1）MESMA模型针对不同的像元采用不同的端元模型，对遥感影像中的混合像元分解，提高了地物分类的精度。经过与无人机面向对象分类结果（总体精度97.09%、Kappa系数0.95）进行地物占

比拟合度计算，与植被像元R^2为0.75，与水体像元R^2为0.84，表明Landsat系列影像通过MESMA模型反演方法适用于分布面积零散的干旱区湿地，提高了地物分类的精度。

（2）2000—2022年博斯腾湖湿地植被面积增加536.65 km^2（183.14%），主要体现在大湖湿地西北、小湖区北部区域；水域面积共减少595.76 km^2（37.07%），在大湖区西北湖滨地带、博斯腾湖南岸以及东岸缩减程度较大，但是在大湖北部呈增加趋势；裸地面积共增加99.12 km^2（25.42%），主要体现在博斯腾湖大湖北岸区域。

（3）博斯腾湖湿地植被30.6%的区域呈增加趋势，主要包括湿地西北部和小湖区北部区域，34.6%的区域呈减少趋势，主要包括小湖区、大湖北岸黄水沟入湖口和东岸带区域。

参考文献（References）

[1] 陈宜瑜, 吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向[J]. 湿地科学, 2003(1): 7-11. [Chen Yiyu, Lü Xianguo. The wetland function and research tendency of wetland science[J]. Wetland Science, 2003(1): 7-11.]

[2] 谭志强, 李云良, 张奇, 等. 湖泊湿地水文过程研究进展[J]. 湖泊科学, 2022, 34(1): 18-37. [Tan Zhiqiang, Li Yunliang, Zhang Qi, et al. Progress of hydrological process researches in lake wetland: A review[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(1): 18-37.]

[3] 马炜, 周天元, 蒋亚芳, 等. 中国湿地保护状况和未来湿地保护的目标和重点[J]. 湿地科学, 2021, 19(4): 435-441. [Ma Wei, Zhou Tianyuan, Jiang Yafang, et al. Protection status and future protection objectives of the wetlands in China[J]. Wetland Science, 2021, 19(4): 435-441.]

[4] 游晓斌, 游先祥, 相莹莹. 混合像元及混合像元分析[J]. 北京林业大学学报, 2003(12): 28-32. [You Xiaobin, You Xianxiang, Xiang Yingying. Mixed pixel and mixed pixel analysis[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003(12): 28-32.]

[5] 张皓楠, 温兴平, 徐俊龙, 等. 影响混合像元分解精度的因子研究[J]. 遥感信息, 2019, 34(3): 48-53. [Zhang Haonan, Wen Xingping, Xu Junlong, et al. Influence factors of decomposition precision of mixed-pixels based on CLSMM[J]. Remote Sensing Information, 2019, 34(3): 48-53.]

[6] 杨超, 王金亮, 渠立权, 等. 最小二乘混合像元分解的端元丰度信息提取研究[J]. 测绘科学, 2017, 42(9): 143-150, 157. [Yang Chao, Wang Jinliang, Qu Liquan, et al. Research on the extraction of surface feature abundance based on the least square mixed pixel decomposition[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(9): 143-150, 157.]

[7] 惠巍巍, 衣德萍, 廖彩霞, 等. 混合像元分解研究综述[J]. 林业科技情报, 2007, 39(1): 2-3. [Hui Weiwei, Yi Deping, Liao Caixia, et al. The study of decomposing mix element[J]. Forestry Science and Technology Information, 2007, 39(1): 2-3.]

[8] 吴见, 彭道黎. 改进线性光谱混合分解模型湿地信息提取[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(3): 140-144. [Wu Jian, Peng Daoli. Wetland information extraction based on improved linear spectral mixture model[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(3): 140-144.]

[9] 李微, 刘伟男, 陈官滨, 等. 基于混合像元分解的辽河口滨海湿地分类[J]. 湿地科学与管理, 2017, 13(1): 25-28. [Li Wei, Liu Weinan, Chen Guanbin, et al. Classification of Liaohe Estuary Coastal Wetlands based on image analysis with decomposition of mixed pixels[J]. Wetland Science & Management, 2017, 13(1): 25-28.]

[10] 李哲, 宫兆宁, 刘先林, 等. 基于面向对象多端元混解模型的植被覆盖度反演及其时空分布研究[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(6): 1149-1158. [Li Zhe, Gong Zhaoning, Liu Xianlin, et al. Vegetation coverage retrieval and spatio-temporal distribution based on object-oriented multi-terminal mixed model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(6): 1149-1158.]

[11] 曾光, 高会军, 朱刚, 等. 近32年新疆博斯腾湖湿地动态变化及机制分析[J]. 国土资源遥感, 2010, 86(增刊1): 213-218. [Zeng Guang, Gao Huijun, Zhu Gang, et al. A remote sensing analysis of wetlands dynamic changes and mechanism in the past 32 years in Bosten Lake, Xinjiang[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2010, 86(Suppl. 1): 213-218.]

[12] 王涛, 陶辉, 雷刚, 等. 博斯腾湖流域植被覆盖变化及驱动因素分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(4): 228-236. [Wang Tao, Tao Hui, Lei Gang, et al. Analysis of vegetation cover changes and its driving forces in Bosten Lake Basin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(4): 228-236.]

[13] 禹泽龙, 徐昔保, 李景宜. 1955—2019年博斯腾湖生态系统服务价值及其影响因素研究[J]. 湿地科学, 2022, 20(3): 395-403. [Yu Zelong, Xu Xibao, Li Jingyi. Ecosystem service values of Bosten Lake from 1955 to 2019 and their influence factors[J]. Wetland Science, 2022, 20(3): 395-403.]

[14] Franke J, Roberts D A, Halligan K, et al. Hierarchical multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) of hyperspectral imagery for urban environments[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(8): 1712-1723.

[15] 马孟莉, 朱艳, 李文龙, 等. 基于分层多端元混合像元分解的水稻面积信息提取[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 154-159. [Ma Mengli, Zhu Yan, Li Wenlong, et al. Extracting area information of paddy rice based on stratified multiple endmember spectral mixture analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(2): 154-159.]

[16] 王浩, 吴炳方, 李晓松, 等. 流域尺度的不透水面遥感提取[J]. 遥感学报, 2011, 15(2): 388-400. [Wang Hao, Wu Bingfang, Li Xiaosong, et al. Extraction of impervious surface in Hai Basin using re-

mote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(2): 388-400.]

[17] 廖春华, 张显峰, 刘羽. 基于多端元光谱分解的干旱区植被覆盖度遥感反演[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3243-3249. [Liao Chunhua, Zhang Xianfeng, Liu Yu. Remote sensing retrieval of vegetation coverage in arid areas based on multiple endmember spectral unmixing[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(12): 3243-3249.]

[18] 刘英, 钟瑞森, 段永超, 等. 博斯腾湖小湖区湿地生态需水量阈值研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1525-1533. [Liu Ying, Zhong Ruisen, Duan Yongchao, et al. Threshold of ecological water demands for the small lake wetland of Bosten Lake[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1525-1533.]

[19] 买尔哈巴·买买提汗. 博斯腾湖芦苇湿地的动态监测及驱动因素分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2017. [Maimaitihan Marerhaba. Dynamic monitoring and driving factors of *Phragmites australis* wetland in Bosten Lake[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2017.]

[20] 姜磊鹏, 丁建丽, 包青岭, 等. 低空遥感结合卫星影像的河道流量反演[J]. 干旱区地理, 2023, 46(3): 385-396. [Jiang Leipeng, Ding Jianli, Bao Qingling, et al. Runoff estimation with low altitude remote sensing and satellite images[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(3): 385-396.]

[21] 张瑞杰, 李俐俐, 李礼, 等. 利用无人机影像数据进行油菜长势监测[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(增刊1): 227-231. [Zhang Ruijie, Li Lili, Li Li, et al. Rapeseed growth monitoring using UAV imagery[J]. Journal of Geomatics, 2021, 46(Suppl. 1): 227-231.]

[22] Quintano C, Fernandez-Manso A, Roberts D A. Burn severity mapping from Landsat MESMA fraction images and land surface temperature[J]. Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal, 2017, 190: 83-95.

[23] 王俊奇, 王广军, 梁四海, 等. 1996—2015年黄河源区植被覆盖度提取和时空变化分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 662-674. [Wang Junqi, Wang Guangjun, Liang Sihai, et al. Extraction and spatio-temporal analysis of vegetation coverage from 1996 to 2015 in the source region of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2): 662-674.]

[24] 陈元鹏, 郧文聚, 周旭, 等. 基于MESMA和RF的山丘区土地利用信息分类提取[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 136-144. [Chen Yuanpeng, Yun Wenju, Zhou Xu, et al. Classification and extraction of land use information in hilly area based on MESMA and RF classifier[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 136-144.]

[25] Roberts D A, Gardner M, Church R, et al. Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 267-279.

[26] 丁建丽, 姚远. 干旱区绿洲典型地物MESMA模拟分解与验证[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(3): 452-460. [Ding Jianli, Yao Yuan. Research on pixel unmixing of typical surface features in oasis based on the MESMA model[J]. Journal of Geo-information Science, 2013, 15(3): 452-460.]

[27] 闫萧萧, 李晶, 杨震. 2000—2016年陈巴尔虎旗植被覆盖度时空变化遥感动态监测[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(6): 121-129. [Yan Xiaoxiao, Li Jing, Yang Zhen. Dynamic remote sensing monitoring on the temporal-spatial changes of vegetation coverage in Chen Barag Banner from 2000 to 2016[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(6): 121-129.]

[28] 耿仁方, 付波霖, 金双根, 等. 面向对象的无人机遥感影像岩溶湿地植被遥感识别[J]. 测绘通报, 2020(11): 13-18. [Geng Renfang, Fu Bolin, Jin Shuanggen, et al. Object-based karst wetland vegetation classification using UAV images[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(11): 13-18.]

[29] 刘耀辉, 于祥惠, 范洁洁, 等. 基于无人机影像和面向对象的中国西部地区农村宅基地面积快速估算[J]. 测绘通报, 2022(6): 125-129. [Liu Yaohui, Yu Xianghui, Fan Jiejie, et al. Rapid estimation of rural homestead area in western China based on UAV imagery and object-oriented method[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(6): 125-129.]

[30] Kattenborn T, Javier F, Michael B, et al. UAV data as alternative to field sampling to map woody invasive species based on combined Sentinel-1 and Sentinel-2 data[J]. Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal, 2019, 227: 61-73.

[31] 陈昂. 基于Google Earth Engine与无人机影像的沙漠化信息提取——以内蒙古正蓝旗为例[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. [Chen Ang. Desertification information extraction based on Google Earth Engine and UAV images: A case study of Zhenglan Banner, Inner Mongolia[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural, 2020.]

[32] 买尔哈巴·买买提汗, 玉素甫江·如素力, 安尼瓦尔·阿布都热依木, 等. 近26 a博斯腾湖芦苇湿地的动态监测及其驱动因素[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 797-804. [Maimaitihan Maierhaba, Rusuli Yusufujiang, Abudureyimu Anniwaer, et al. Dynamic variation of *Phragmites australis* wetland in the Bosten Lake Basin and its driving factors in recent 26 years[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 797-804.]

[33] 彭妍菲, 李忠勤, 姚晓军, 等. 基于多源遥感数据和GEE平台的博斯腾湖面积变化及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(6): 1131-1153. [Peng Yanfei, Li Zhongqin, Yao Xiaojun, et al. Area change and cause analysis of Bosten Lake based on multi-source remote sensing data and GEE platform[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(6): 1131-1153.]

[34] 李玉焦, 陈亚宁, 张齐飞, 等. 1960—2018年博斯腾湖水位变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 48-58. [Li Yujiao, Chen Yaning, Zhang Qifei, et al. Analysis of the change in water level and its influencing factors on Bosten Lake from 1960 to 2018[J] Arid Zone Research, 2021, 38(1): 48-58.]

Spatiotemporal variation characteristics and trend analysis of vegetation and water area in the Bosten Lake based on multiple endmember spectral mixture analysis model

Yaxiaer AISIKEER[1], Yusufjiang RUSULI[1,2]

(1. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China;

2. Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Areas of Xinjiang, Urumqi 830054, Xinjiang, China)

Abstract: High-precision remote sensing monitoring of dynamic changes in wetlands is of great practical significance for wetland conservation and restoration. Taking the wetland of Bosten Lake in Xinjiang as the research object, we use the multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) method to extract the vegetation, water body, and bare land area from Landsat images, verify the accuracy by UAV images, and then combine with the trend analysis method to explore the spatial and temporal change characteristics and trends of Bosten Lake wetland from 2000 to 2022. The results show that: (1) The MESMA classification results verified by the resampling accuracy of UAV images showed that the goodness of fit (R^2) of vegetation image element is 0.75 and the R^2 of water body image element R^2 is 0.84, indicating that the classification results were consistent with the actual feature conditions. (2) From 2000 to 2022, the vegetation area of Bosten Lake increased by 536.65 km^2, an increase of 183.14%; the water area decreased by 595.76 km^2, a decrease of 37.07%; the bare land area increased by 99.12 km^2, an increase of 25.42%. (3) The area of vegetation in the wetlands of Bosten Lake with an increasing trend accounts for 30.6% of the total area, which is located in the northwestern part of the Great Lake and the northern part of the Small Lake; on the contrary, the area of water with a decreasing trend accounts for 34.6% of the total area, which is located in the northern and eastern shores of the Great Lake and the wetlands of the Small Lake. To accurately grasp the spatial and temporal changes of Bosten Lake wetlands and their trends, it provides a reference basis for monitoring and protecting inland wetlands in the arid zone.

Key words: MESMA; mixed pixel; wetland; spatiotemporal variation; Bosten Lake